

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА DANSS С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. А. Скробова^{1,2,3}

Детектор DANSS является сцинтилляционным детектором, окруженным пассивной и активной защитой. В работе описана процедура калибровки по энергии индивидуальных сцинтилляционных ячеек детектора при помощи космических мюонов.

Ключевые слова: нейтринные осцилляции, сцинтиллятор, ядерный реактор.

Введение. DANSS [1] – сцинтилляционный пластиковый детектор объемом 1 м³, разбитый на 2500 ячеек с гадолиниевым покрытием и окруженный, для подавления внешнего фона, пассивной защитой из меди, свинца и борированного полиэтилена. Для дискриминации фона от мюонов используются плоские сцинтилляционные счетчики, расположенные снаружи пассивной защиты. Каждая из 2500 сцинтилляционных ячеек (СЯ) детектора считывается с помощью трех спектросмещающих волокон (СВ), см. рис. 1. Центральное СВ считывается при помощи кремниевого фотоумножителем (КФУ). Боковые СВ с каждых 50 СЯ считываются с помощью одного фотоумножителя.

Одной из задач детектора DANSS является поиск осцилляций реакторных $\bar{\nu}_e$ на коротких расстояниях с целью обнаружения стерильного нейтрино. Для этого необходима очень высокая стабильность по времени энергетического отклика детектора и знание энергетической шкалы. Это достигается за счет постоянной калибровки детектора с помощью космических мюонов.

Восстановление треков мюонов. Для калибровки СЯ производится восстановление треков мюонов по сигналам с КФУ. По восстановленному треку вычисляется длина трека частицы внутри СЯ и соответствующее ей энергосодержание. Сравнивая среднее количество фотоэлектронов с КФУ и энергосодержание внутри соответствующей СЯ, получаем коэффициенты пересчета из фотоэлектронов в МэВ для отклика ячеек.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nataliya.skrobova@yandex.ru.

² Институт теоретической и экспериментальной физики НИЦ “Курчатовский институт”, 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25.

³ Московский физико-технический институт, 141701 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

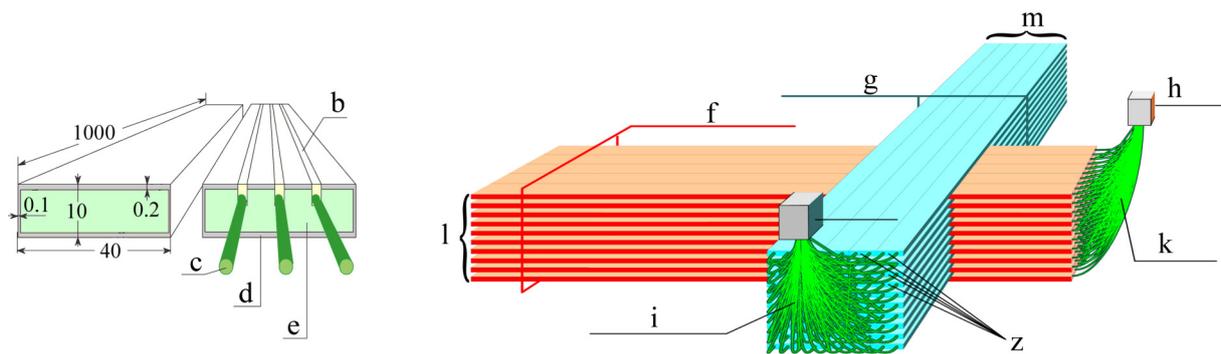


Рис. 1: Структура и расположение СЯ в детекторе, на левой картинке единицы в мм. *a* – габариты СЯ. Размеры в мм; *b* – канавки с боковыми СВ, *c* – спектрсдвигающее волокно (СВ), *d* – гадолинийсодержащее покрытие, *e* – сцинтиллятор; *f* – X-модуль, *g* – Y-модуль, *h* – фотоумножитель; *i*, *k* – 100 СВ, *j*, *z* – КФУ, *m* – 1 слой = 5 СЯ – 20 см, *n* – 10 слоев – 20 см.

Первоначальная отладка алгоритма восстановления треков мюонов производилась на данных, смоделированных методом Монте-Карло (МК) в системе GEANT4. Поиск треков производился отдельно в проекциях XZ и YZ с использованием метода Хафа, исключавшего ложные срабатывания СЯ.

Прямая на плоскости может быть описана уравнением вида $r = x \cos \theta + y \sin \theta$, где r – расстояние от прямой до начала координат, а θ – угол между осью абсцисс и перпендикуляром к прямой. Любая прямая соответствует точке в пространстве параметров Хафа (r, θ) . Все прямые, проходящие через точку (x_0, y_0) , удовлетворяют уравнению $r = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$. Эта кривая – синусоида в пространстве Хафа. Точка пересечения двух синусоид (в пространстве Хафа) соответствует прямой (в пространстве (x, y)), которая проходит через обе точки x_0y_0 и x_1y_1 . В общем случае, ряд точек, формирующих прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке, соответствующей значениям параметров для этой линии. Итак, преобразование Хафа сводит проблему обнаружения прямой в пространстве координат к проблеме обнаружения пересекающихся кривых в пространстве параметров.

Для точек, соответствующих центрам сработавших СЯ, осуществлялся переход из координатного пространства к пространству Хафа. Результат каждого такого преобразования помещался в трёхмерную гистограмму, а затем в гистограмме определялся максимум (рис. 2). Далее, исходя из полученных значений (r, θ) максимума, определялись параметры проекций трека на плоскости XZ и YZ .

Для СЯ, с которыми пересекается трек, полученный при помощи преобразования Хафа, определяется наибольшая связная область. СЯ, не вошедшие в состав связной области, из рассмотрения исключались. В результате получается набор точек, уже пригодных для фитирования, поскольку в событиях теперь не содержатся лишние шумы.

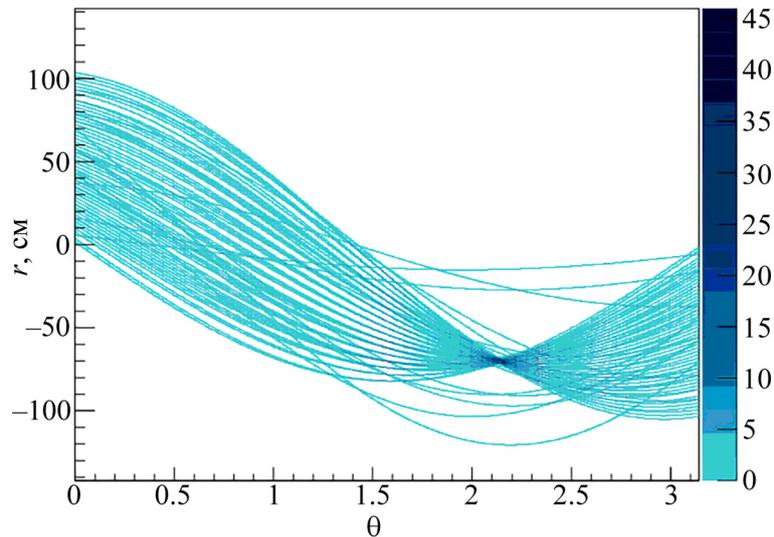


Рис. 2: Событие в пространстве Хафа.

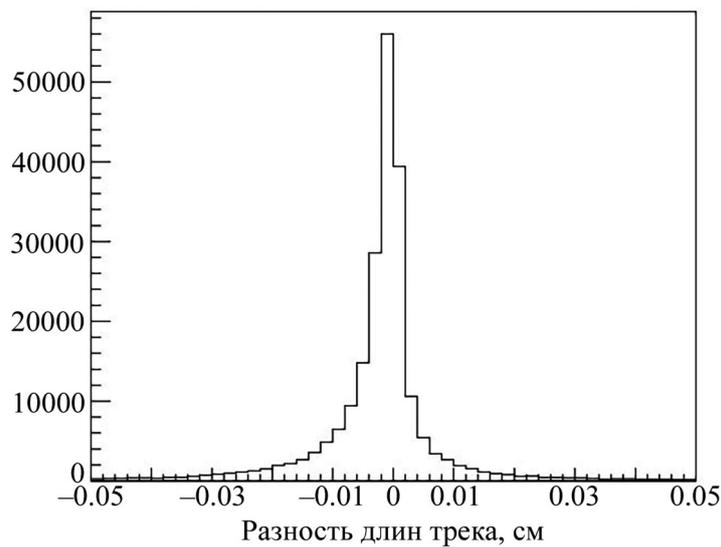


Рис. 3: Распределение разности длин.

По трекам в проекциях XZ и YZ восстанавливается трек мюона в пространстве и вычисляется длина трека внутри СЯ. Для калибровки детектора важна точность опре-

деления длины трека частицы внутри СЯ. Разность между восстановленной длиной трека в СЯ и длиной трека из рассчитанного по МК, представлена на рис. 3. Ширина на полувысоте составляет 0.005 см, что с учетом характерной длины в 1 см и более дает относительную точность $\sim 0.5\%$.

Энергетическая калибровка. Предварительная калибровка КФУ была произведена по шумовым спектрам. В результате данные с детектора были переведены из каналов АЦП в фотоэлектроны. При этом учитывалась оптическая связь между ячейками КФУ и нелинейность его отклика.

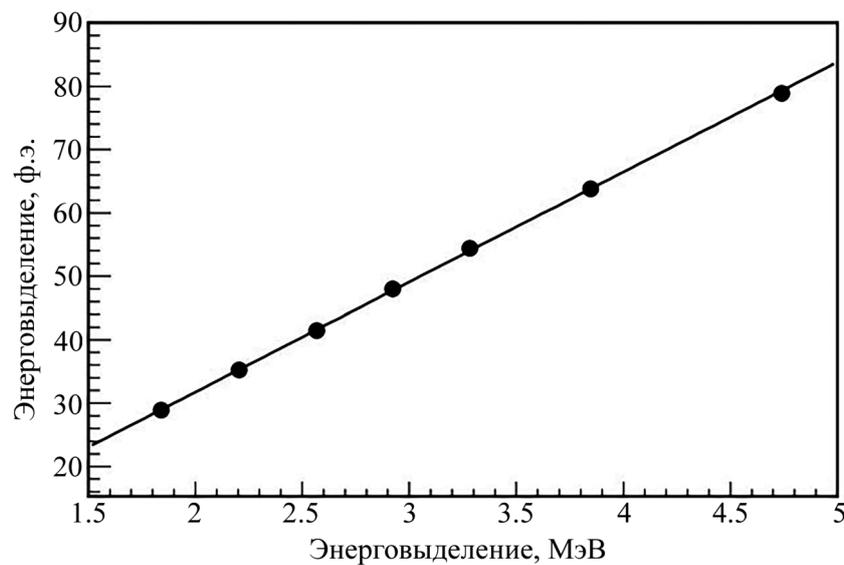


Рис. 4: Зависимость энергосъема в ф.э. от МэВ, данные с детектора.

Для определения наиболее вероятных потерь на единицу длины было произведено восстановление треков мюонов, идущих под разными углами, смоделированных в МК. Были получены распределения энергосъема для узких интервалов полученных длин треков, которые фитировались распределением Ландау. В каждом из распределений определялись наиболее вероятные потери энергии.

Для каждой из 2500 сцинтилляционных ячеек строились распределения по числу зарегистрированных фотоэлектронов для узких интервалов длин треков внутри СЯ. Они фитировались сверткой распределений Гаусса и Ландау. В каждом из интервалов строилось распределение длин и определялось среднее значение длины в данном интервале. Используя полученную выше зависимость для пересчета пройденной длины в величину наиболее вероятного энергосъема, можно получить зависимость отклика детектора в фотоэлектронах от выделенной энергии в электрон-вольтах (рис. 4), та-

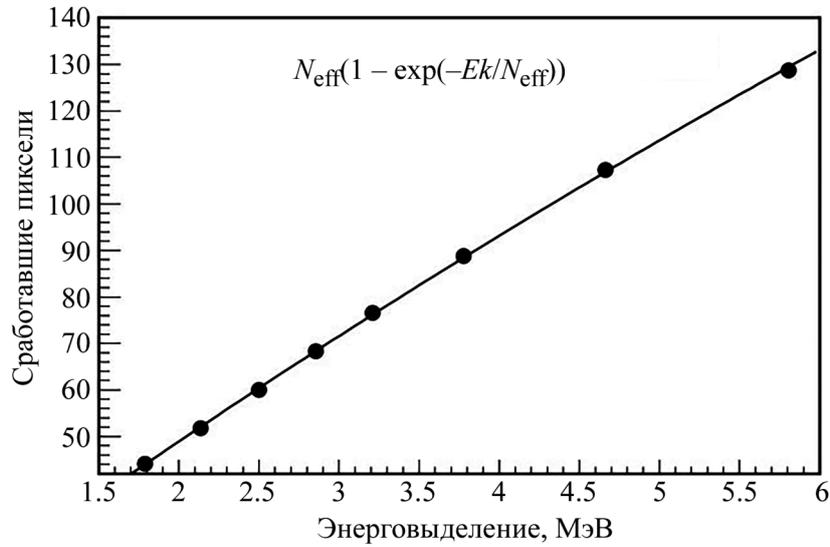


Рис. 5: Определение эффективного числа пикселей.

ким образом произведя калибровку. Вышеописанный анализ был проведен на данных с детектора и проверен на данных, полученных при помощи МК. Для данных, полученных методом моделирования Монте-Карло, восстановленный световой выход составляет 15.24 ± 0.14 ф.э./МэВ, что согласуется с заложенными в исходную модель 15.0 ф.э./МэВ.

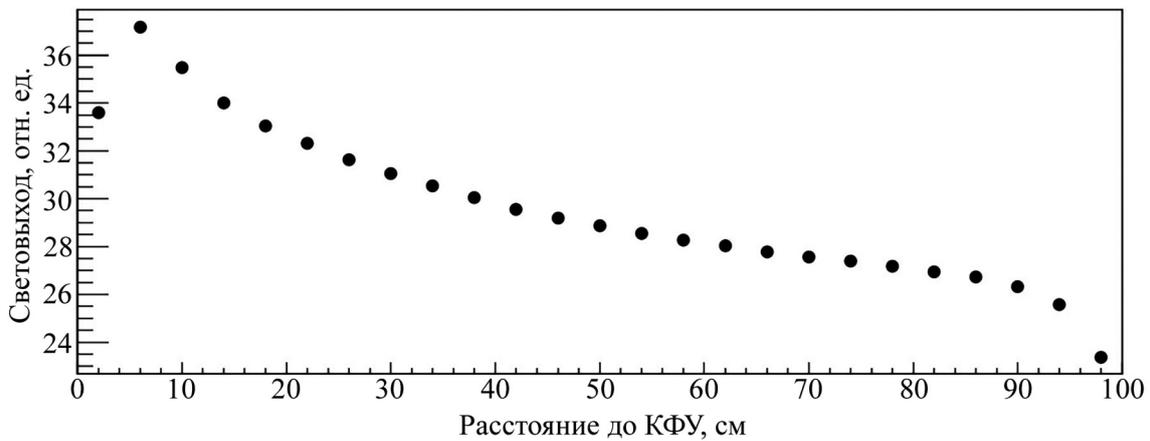


Рис. 6: Продольная неоднородность отклика ячеек.

Поскольку число пикселей КФУ конечно, имеется эффект насыщения. Вследствие неравномерности засветки возникает необходимость определить эффективное число пикселей КФУ. Это число можно получить из нелинейности отклика по данным без предварительной калибровки КФУ (рис. 5). В результате получено эффективное

число пикселей 512 ± 19 , что заметно отличается от номинального 667. Процедура описана подробнее в [3].

Восстановленные треки мюонов позволяют определять координату пересечения трека с СЯ, что позволяет определить зависимость световыхода СЯ от расстояния от трека до КФУ, т.е. длины СВ, пройденной светом. Результат представлен на рис. 6. При анализе событий с детектора вводится коррекция на измеренную продольную неоднородность.

Заключение. Регулярная калибровка детектора при помощи мюонов обеспечивает его стабильную работу. Создание детектора поддерживалось Госкорпорацией “РосАтом” в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.90.13.1119 и № Н.4х.44.9Б.16.1006, а анализ данных – грантом РНФ 17-12-01145.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. Alekseev et al., JINST **11**(11), 11011 (2016).
- [2] R. O. Duda and P. E. Hart, Comm. ACM **15**, 11 (1972).
- [3] I. G. Alekseev, V. V. Belov, M. V. Danilov, et al., Phys. Part. Nuclei Lett. **15**, 272 (2018); <https://doi.org/10.1134/S1547477118030020>.

Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.

Печатается по материалам VII межинститутской молодёжной конференции “Физика элементарных частиц и космология 2018”, Москва, ФИАН, 2018.